

# 地下空间出入楼梯洪水动力特性试验研究

申若竹<sup>1</sup>, 杨敏<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 中国水电工程顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 近年来国内外已有许多城市的极端强降水事件造成了地下空间受淹而导致巨大损失的发生, 而地下空间防洪方面的研究成果寥寥无几。本文通过地下空间出入楼梯的水工模型试验, 重点将人体所受水流阻力与流量的关系作为一个新的研究角度, 研究了入侵洪水的动力特性: 当流量达到安全撤离的临界条件  $0.28 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时, 最大流速到达  $3.9 \text{ m/s}$ 。水流对人体的阻力随着流量的增加呈线性增长, 双腿站立的阻力与流量关系曲线的斜率较单腿站立的大; 在最不利的着装条件下, 单腿受力的最大值为  $3.93 \times 9.8 \text{ N}$ , 双腿受力的最大值为  $8.96 \times 9.8 \text{ N}$ 。其结果为防洪设计和疏散指导工作提供理论依据, 并为今后地下空间洪水入侵机理的研究提供参考。

**关键词:** 地下空间; 洪水入侵; 洪水动力特性; 模型试验

中图分类号: TV131.65

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0124-04

## Experiment on hydrodynamic characteristics of passageway in underground space

SHEN Ruozhu<sup>1</sup>, YANG Min<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University,

Tianjin 300072, China; 2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In recent years, extreme heavy precipitation events have happened and caused enormous losses to underground space at home and abroad. At present, reports about the problem of flood intrusion mechanism and hydrodynamic characteristics in underground space are few and unsystematic. This paper deals with a hydraulic model test of inundation in the passageway of underground space. Through numerous experiments under the various conditions, intrusive flow behaviors in the stairs of underground space are studied in details. The maximum velocity of the staircase is  $3.9 \text{ m/s}$  when the flow discharge reaches to  $0.28 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ . The drag force build-up curves have similar trends, which are all propinquity to liner-growth. The slope of force - discharge relation curve standing by double legs is bigger than the one standing by one leg. The maximum drag force of one leg is  $3.93 \times 9.8 \text{ N}$  while the one of double legs is  $8.96 \times 9.8 \text{ N}$  under the most unfavorable condition. The results provide theoretical significance to guide the normal design and evacuation in underground space and provide reference for the flood invasion mechanism research in the future.

**Key words:** underground space; flood intrusion; flood hydrodynamic characteristics; model test

## 1 研究背景

随着社会经济的快速发展, 城市土地资源越来越紧缺, 人们开始大规模地开发地下空间, 这不仅在很大程度上缓解了城市土地资源的开发进程, 减轻了地面交通压力, 而且科学合理的开发也给社会创造了财富。然而, 地下空间作为地上洪水极易入侵的半封闭性空间, 水灾的危险性极高。由于近年城

市极端强降水事件的日趋增多, 地下空间受洪涝袭击而被淹的概率已经不容忽视。从 1999 年开始, 地下空间的洪涝灾害被视为城市洪涝灾害的一个新形式, 地下空间防洪的研究势在必行。

总体来说, 各个国家在城市地下空间防洪方面的研究较少。日本是开发利用城市地下空间较早、技术也较为成熟的国家之一, 其研究最早约始于 20 世纪 90 年代初。近几年, 德国和韩国的学者也陆续开

收稿日期: 2012-09-24; 修回日期: 2012-10-10

作者简介: 申若竹(1987-), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 主要从事水工水力学研究。

通讯作者: 杨敏(1956-), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 主要从事水工水力学方面的研究。

始这方面的研究。而我国对于地下空间洪水的研究才刚刚起步,没有建立相应的数学模型和物理模型。

地下空间洪水入侵过程的数值模拟,日本学者<sup>[1-6]</sup>采用了一维、二维以及三维的“蓄水池模型”和 VOF 模型来模拟地下空间的进水量以及洪水扩散的过程。Takahashi T<sup>[7]</sup>在 1990 年提出采用跌水公式来确定入侵的洪水流量;地下空间内部模拟理论,最成熟的是 Toda K<sup>[8]</sup>提出的“蓄水池模型”,即以多个相互连通的蓄水池来表达地下空间的三维模型,洪水的扩散表现为各相邻蓄水池间的流通。韩国的 Han<sup>[9]</sup>等在模拟城市地表淹没过程时也考虑了地下空间,采用 Link - Node 模式来确定地下空间的淹没范围与水深。德国的 Oertel<sup>[10]</sup>将简单的地下空间分为洪水、地下室、楼梯、出入口 4 个模块进行网格划分计算。

物理模型与数学模型的结合有利于增强对城市地下空间淹没过程的感性认识,也有利于数学模型的改进与提高。东京大学宇治川水力实验室的 Inoue K<sup>[11]</sup>等研究人员首次建立了一个大型的城市立体空间洪水试验模型。试验结果表明,一旦洪水进入地下空间,淹没面积迅速扩展,水位上升非常快。从楼梯逃生的可能性受楼梯处流量影响,水位一旦达到 0.5m,人们将不可能通过楼梯。Ishigaki T<sup>[12]</sup>等人进行了实际尺寸的地下空间洪水试验。实验结果表明,洪水发生时从楼梯安全逃生的临界水深为 0.3 m。

洪灾发生时,从地下空间逃生成功的关键是通过它与外界联通的通道,然而地下空间出入楼梯水动力特性的研究仍然缺乏系统性。本文通过地下空间出入楼梯的水工模型试验,在各种试验条件下详细研究了地下空间出入楼梯的水流特性,从而为防洪设计与疏散指导工作提供理论依据,并为今后地下空间洪水入侵机理的研究提供参考。

2 模型试验设计

系列试验在天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室进行,建造足尺比例的地下空间出入楼梯模型,进行洪水入侵流量、流速与水流阻力的同步测量。模型高 4.08 m,宽 1 m,共 24 个台阶,每个台阶宽 0.3 m,高 0.17 m,如图 1、2 所示。

2.1 流量流速的测量

文献[12]指出地面积水深达到 0.3 m,即单宽流量达到 0.28 m<sup>3</sup>/(s·m)是地下空间洪水发生时能安全撤离的临界条件,所以将 0.28 m<sup>3</sup>/(s·m)作

为本次试验的最大流量。流量的测量采用等宽薄壁堰,按照李炜<sup>[13]</sup>提出的等宽薄壁堰方程计算洪水流量。在出入楼梯顶部的洪水流量保持不变的情况下,采用 LGY - III 型多功能智能流速仪测量楼梯下部的流速。

2.2 人体所受阻力的测量

水流沿台阶跌落或者滑行而下,对人体前行造成一定的阻力,阻力的大小是其能否安全撤离的决定性因素。在以往的试验中,并未深入研究流量(流速)和阻力的关系,因此研究在不同流量下人体不同的站立方式和着装条件所受水流阻力的情况,将对洪水入侵地下空间有更为全面的认识。为了真实地模拟实际过程,将力传感器是安装在腿模中,力的测量采用北京东方振动和噪声技术研究所开发的 DASP 智能数据采集和信号处理系统。试验根据模型的站立方式不同分为单腿站立和双腿站立 2 组,每组具有 4 种不同的着装条件,如图 3 所示。在 7 组不同流量条件(见表 1)下,对比分析不同的站立方式及着装条件的受力情况。

| 表 1 试验条件 |      | m <sup>3</sup> /(s·m) |      |      |      |      |      |      |
|----------|------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|
| 站立方式     | 着装条件 | 单宽流量                  |      |      |      |      |      |      |
|          |      | 0.09                  | 0.12 | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.24 | 0.28 |
| 单腿       | 光腿   | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
|          | 鞋    | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
|          | 裤子   | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
|          | 鞋和裤子 | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
| 双腿       | 光腿   | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
|          | 鞋    | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
|          | 裤子   | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |
|          | 鞋和裤子 | √                     | √    | √    | √    | √    | √    | √    |

3 试验结果及分析

3.1 水流流态

水流在很短的时间内倾斜下来,经过一段距离后流速和水深趋于稳定。在各个不同的流量下,出现的流态依次为跌落流、过渡流和滑行流,如图 4。

当流量较小时,在各台阶隅角与主流之间有一个近似三角形空腔存在,空腔下为一近似梯形静水池,流股出现较大的弯曲,此时为跌落流;随着流量的增大,一些台阶内有类似跌落水流的三角形空腔形成,而另一些台阶内有类似滑行水流的横轴旋涡形成,并且这两种形态沿台阶向下游交替存在于台阶表面与主流之间,为过渡流;当各台阶全部被水充填,没有空腔存在,并在各台阶隅角和主流之间形成

一个横轴旋涡,靠近主流处旋涡旋转方向和主流流动方向一致,则为滑行流<sup>[14]</sup>。

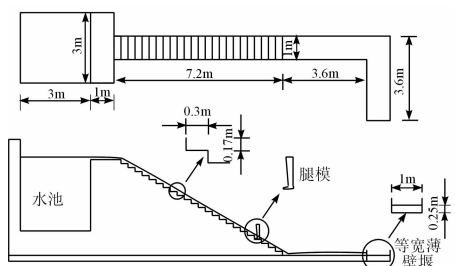


图1 模型体型示意图



图2 地下空间出入楼梯模型



图3 人体的部分着装条件



(a) 跌落流  $q=0.09 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$



(b) 过渡流  $q=0.12 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$



(c) 滑行流  $q=0.28 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$

图4 不同流量下的水流流态

### 3.2 流速与流量的关系

2005年 Ishigak T<sup>[11]</sup>测量了不同流量下楼梯不同水平距离各点的流速,得到楼梯流速不断增大而到中下段趋于稳定的结论。故出现在楼梯下部的最大流速是洪灾发生时人们是否可以顺利上楼逃生的关键,本次试验流速的测点设在楼梯的下部以获得最大流速。为了验证试验测点选取的可行性,同时采用VOF模型对整个研究区域进行三维数值模拟计算,计算模型如图5所示。

根据各流量下物模和数模的流速数据,绘出它们的关系曲线,见图6。可以看出,数模计算的最大流速值略高于试验值,平均误差小于5%,二者的结果较为吻合,相互验证。因此试验所选的测点切实可行。

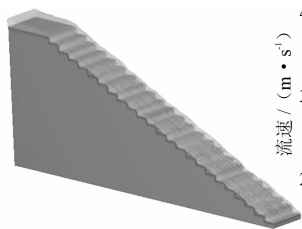


图5 三维数值计算模型

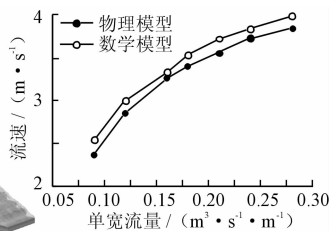


图6 流速与流量关系曲线

从试验结果可以看出,随着流量的增大,流速呈对数增长,当单宽流量达到  $0.28 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时,流速达到最大值  $3.9 \text{ m/s}$ 。

### 3.3 人体所受水流阻力

人在水中前进主要受到两种形式的阻力。一是

压差阻力,水绕着人体流向身后并产生漩涡,形成前后的压力差,迎水截面积越小且越接近流线型,压差阻力就越小。二是摩擦阻力,由于水具有粘滞性,前进时附着在身体表面的水分子便会阻碍相邻层面的水分子前进,从而产生摩擦阻力,摩擦阻力和迎水表面积及粗糙度成正比相关。

人体在不同着装条件下单、双腿站立的受力情况如图7所示。分析比较图7中四种着装条件下,人体单腿以及双腿的受力情况可知:

(1)从各试验情况来看,随着流量的增加,不论是单腿还是双腿站立,人体受力均呈线性增长。在流量相同的情况下,不同的着装受力从小到大依次为:光腿,穿鞋,穿裤子,穿鞋和裤子。

(2)单腿站立时,光腿的受力增加相对缓慢。当流量达到地下空间洪水发生时能安全撤离的临界条件时,阻力达到最大值  $2.43 \times 9.8 \text{ N}$ 。在穿鞋的情况下,由于迎水表面积和表面粗糙程度均有增大,故人体受力较光腿的情况平均增加19%,最大值为  $2.79 \times 9.8 \text{ N}$ 。在穿裤子的情况下,松懈又粗糙的布料使得阻力更为明显地增大,受力平均增量达光腿的45%,最大值为  $3.6 \times 9.8 \text{ N}$ 。显然,穿鞋和裤子的情况最不利,受力平均增量达光腿的61%,最大值为  $3.93 \times 9.8 \text{ N}$ 。

(3)双腿站立时,在光腿的情况下阻力达到最大值  $4.97 \times 9.8 \text{ N}$ 。在穿鞋的情况下,人体受力较光腿的情况平均增加20%,最大值为  $6.05 \times 9.8 \text{ N}$ 。

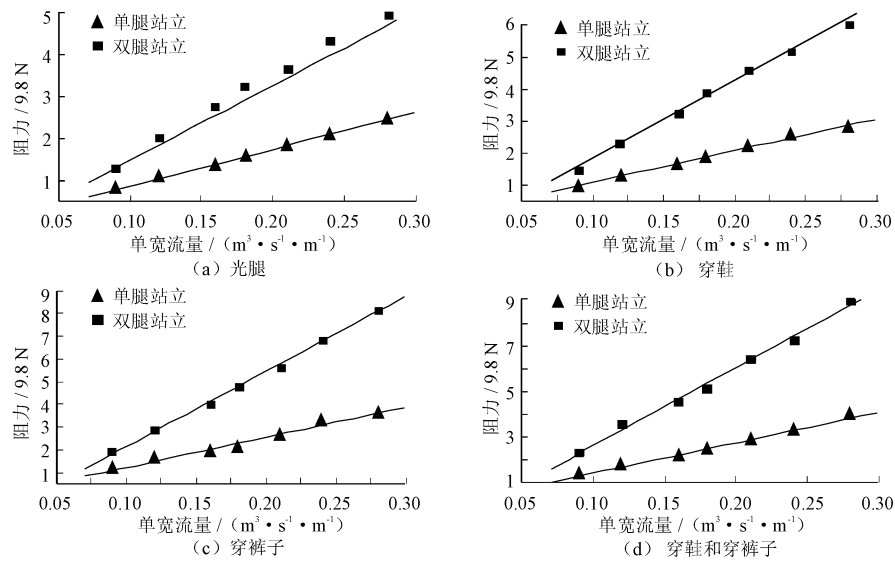


图 7 不同着装条件下人体单、双腿站立的受力与流量的关系

在穿裤子的情况下,受力平均增量达光腿的 52%,最大值为  $8.16 \times 9.8 \text{ N}$ 。穿鞋和裤子的情况,受力平均增量达光腿的 73%,最大值为  $8.96 \times 9.8 \text{ N}$ 。

(4) 双腿站立所受的阻力与单腿站立所受阻力并不是简单的倍数关系。双腿站立的阻力与流量关系曲线的斜率较单腿站立的大,故二者之间的比例随着流量不断的增加而增加。综合上述分析,可以给出在本试验条件下的阻力与流量之间的关系如公式(1):

$$\begin{cases} N_1 = (-0.002 + 8.7q) \times n_1 + (-0.371 + 19.35q) \times n_2 \\ N_2 = (0.096 + 9.91q) \times n_1 + (-0.598 + 24.18q) \times n_2 \\ N_3 = (-0.118 + 13.31q) \times n_1 + (-1.171 + 33.14q) \times n_2 \\ N_4 = (0.092 + 13.38q) \times n_1 + (-0.796 + 34.25q) \times n_2 \\ (n_1, n_2) = (0, 1) \text{ 或 } (1, 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $N_1, N_2, N_3, N_4$  分别代表光腿、穿鞋、穿裤子、穿鞋和裤子时所受到的水流阻力, $q$  代表入侵洪水的单宽流量, $n_1, n_2$  分别代表单腿站立和双腿站立。

为验证试验结果的科学合理,并将理论研究更直观地运用于实际,在后续的工作中将进行人员疏散撤离试验,从不同的性别及年龄层选择测试人员,研究疏散过程中人员的着装以及行进方式对其逃生的影响。

4 结 语

地下空间出入楼梯水动力特性是城市地下空间

防洪研究的一个重要部分。本文进行了系列试验研究来揭示这一过程,得出的结论如下:

(1) 入侵地下空间的洪水的流态在出入楼梯处随着流量的增加依次表现为跌落流、过渡流和滑行流。由于流速沿着阶梯而下逐渐增大并趋于稳定,故楼梯的下部的流速是决定人们是否可以逃生的关键。

(2) 流速随着流量的增加呈对数增长。当流量达到地下空间洪水发生时能安全撤离的临界条件  $0.28 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  时,楼梯的最大流速为  $3.9 \text{ m/s}$ 。

(3) 不论是单腿还是双腿站立,人体受力随着流量的增加均呈线性增长,且在相同的着装条件下,双腿站立的阻力与流量关系曲线的斜率较单腿站立的大。在流量相同的情况下,不同的着装受力从小到大依次为:光腿,穿鞋,穿裤子,穿鞋和裤子。在最不利的着装条件下,单腿受力的最大值为  $3.93 \times 9.8 \text{ N}$ ,双腿受力的最大值为  $8.96 \times 9.8 \text{ N}$ 。

参考文献:

[1] Toda K, Inoue K and Kuriyama K. Numerical simulation of overland flood flow intrusion into underground space in urban area[C]//. Proceedings of the Symposium on Underground Space, 2001. 6:109 – 115.

[2] Toda K, Inoue K and Tanino T. Analysis of overland flood flow intrusion into underground space[J]. Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University, 1998, 41B – 2:313 – 323.

[3] Inoue K, Toda K and Kawaike K. On flood inundation analysis in underground space[J]. Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University, 2002, 45B:173 – 184.

要求,能够保证这些改造点的供水。

经过最终分析论证,改造后的管网压力分布比较平衡,各管网末端的节点压力满足供水要求,各管段的流速也基本符合经济流速,某个管网出现问题时,相邻的管网可以给予补给,保障了该区域供水系统的稳定,该改造方案也通过了最后审核并得到采纳。

## 4 结 语

本文利用 EPANET 软件对天津市某区域的供水管网进行水力计算,明确了现有管网存在的问题。针对这种情况,设计了相应的改造方案,使整个区域的供水管网连通,并对改造后的管网进行了水力计算分析,验证了改造方案的合理性,达到了保障该区域供水安全的目的。

该软件还具有调度管理、水质分析等功能,更便于供水管网的日常和应急管理。由于 EPANET 软件的源代码是开放的,还可以对其编程,进一步改善其功能;此外,还可以和 GIS 等联合使用,真正实现管网系统运行的数字化。

## 参考文献:

- [1] Vasan A, Simonovic Slobodan P. Optimization of water distribution network design using differential evolution[J]. Water Resources Planning And Management, ASCE, 2010, 136(2): 279 – 287.
- [2] 王郁超,陶月赞,郭增辉. EPANET 软件在农村供水管网设计中的应用[J]. 给水排水工程, 2011, 29(2): 58 – 60.
- [3] 张凤娥,曾念,张敏,等. 用 EPANET 水力模型优化乡镇供水管网[J]. 中国给水排水, 2008, 24(2): 43 – 45.
- [4] 庄宝玉. 区域供水管网规划的优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [5] 魏 炜,贾海峰,苏保林. 水力平差模型在供水规划中的应用[J]. 北京水务, 2006, (3): 31 – 34.
- [6] 陆际汉. 给水管网平差精确算法——水力比拟法[J]. 中国给水排水, 2010, 26(24): 62 – 66.
- [7] 严熙世,范瑾初. 给水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [8] Lewis A R. Epanet2 Users Manual[M]. USA: Environment Protection Agency, 2000: 122 – 123.
- [9] 牟守国. 城市改扩建给水管网管材的选择[J]. 中国高新技术企业, 2010(15): 83 – 84.
- [10] Hart K Y Kim G and Lee C H. Modeling of flood Inundation in urban areas including underground space[C]//. 4th International Symposium on Flood Defense, Toronto, Ontario, Canada, 2008.
- [11] Oertel M. Flooding of underground facilities in urban regions after malfunction of flood protection measures [C]//. 4th International Symposium on Flood Defense. Toronto, Ontario, Canada, 2008.
- [12] Inoue K, Toda K and Nakai T. Simulation on the inundation process in the underground space[J]. Disaster Prevention Research Institute Annual, Kyoto University, 2003, 46B: 275 – 286.
- [13] Ishigaki T, Toda K and Baba Y. Experimental study on evacuation from underground space by using real size models[J]. Disaster Prevention Research Institute Annual, Kyoto University, 2005, 48B: 639 – 646.
- [14] 李 炜. 水力学计算手册[M]. 北京: 水利水电出版社, 2006: 257 – 258.
- [15] 田嘉宁,大津岩夫,李建中. 台阶式溢洪道各流况的消能特性[J]. 水利学报, 2003, 34(4): 35 – 39.
- [16] Yoneyama N, Aihata S and Toda K. Numerical analysis for inundation process of small underground space in urban flood[J]. Disaster Prevention Research Institute Annuals, 2006, 49B: 575 – 582.
- [17] Toda K, Oyagi R and Inoue K. On the inundation process in the underground space in urban flooding[J]. Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University, 2004, 47B: 293 – 302.
- [18] Toda K, Inoue K and Oyagi R. Flood inundation in underground space and its simulation analysis[C]//. Proceedings of the Symposium on Underground Space, 2003. 8.
- [19] Takahashi T, Nakagawa H and Nomura I. Simulation method on inundation in an underground space due to intrusion of overland flood flows[J]. Disaster Prevention Research Institute Annual, Kyoto University, 1990, 33 B – 2: 427 – 442.
- [20] Toda K, Kuriyama K and Oyagi R. Inundation analysis of complicated underground space [J]. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering(JSCE), 2004, 22(2): 47 – 58.